

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Bakalaureusetöö
Keskkonnatehnoloogia
12 EAP

**HeO meetodi ja pimekambri meetodi võrdlus kasvuhoonegaaside
N₂O ja CH₄ voogude mõõtmiseks Aardlapalu poldri näitel**

Mihkel Kaljuvee

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja: Martin Maddison, PhD

Tartu, 2017

HeO meetodi ja kambrimeetodi võrdlus kasvuhoonegaaside N₂O ja CH₄ voogude mõõtmiseks Aardlapalu poldri näitel

Käesolevas bakalaureusetöös uuriti HeO meetodi ja suletud pimekambri meetodil mõõdetud kasvuhoonegaaside N₂O ja CH₄ voogusid Aardlapalu poldril madala veetaseme tingimustes. Suletud ehk staatilise pimekambri meetodiga mõõdeti viiest kohast ~25 m² suuruselt ringikujuliselt alalt kolme päeva jooksul nii, et mõõdeti iga hommik ja õhtu. HeO meetodi jaoks võeti kambrimeetodi rõngaste lähedalt mullapuuriga viielt sügavuselt (0-6; 6-12; 12-18; 18-24; 24-30 cm) mullakehad. Suuremad seosed kahe meetodi vahel esinesid, kui võrreldi kambrimeetodi keskmisi väärtuseid HeO meetodi 0-6 cm kihi väärtustega.

Märksõnad: *staatiline pimekamber, HeO meetod, kasvuhoonegaasid*

CERCS: T270 Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

Comparison of gas-flow-soil-core technique and chamber technique to measure fluxes of greenhouse gases N₂O and CH₄ in Aardlapalu polder

In present thesis greenhouse gases N₂O and CH₄ fluxes at Aardlapalu polder were studied in low water table conditions using gas-flow-soil-core technique and closed chamber technique. With the closed (static) chamber technique measurements were taken from five spots at ~25 m² circular area within three days in mornings and evenings. For the gas-flow-soil-core technique soil cores were extracted near the chamber technique chambers with a soil drill in five depths (0-6; 6-12; 12-18; 18-24; 24-30 cm). Stronger correlations appeared when chamber technique's average values were compared with gas-flow-soil-core technique's 0-6 cm layer values.

Keywords: *static closed chamber, gas-flow-soil-core technique, greenhouse gases*

CERCS: T270 Environmental technology, pollution control

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Kirjanduse ülevaade	6
1.1. Madalsood	6
1.2. Lämmastikuühendid ja nende ringlus	7
1.3. Kambrimeetod kasvuhoonegaaside mõõtmiseks	8
1.4 HeO meetod N_2 , N_2O ja CH_4 emissiooni mõõtmiseks mullast	9
1.5 Kasvuhooneefekt	10
2. Materjal ja meetodika	11
2.1. Uurimisala	11
2.2. Kambrimeetodil CH_4 ja N_2O mõõtmine	12
2.3. HeO meetodil CH_4 , N_2O ja N_2 mõõtmine	13
2.4. Keskkonnaparameetrid ja keemiaanalüüs mullaproovidest	13
2.5. Andmeanalüüs	14
3. Tulemused	15
3.1. N_2O voog	15
3.2. CH_4 voog	16
3.3. N_2 voog	17
3.4. HeO meetod vs pimekambri meetod	19
3.5. HeO mullagaaside seos keskkonnaparameetrite ja mullakeemiaga	20
4. Arutelu	23
4.1. N_2O voog	23
4.2. CH_4 voog	24
4.3. N_2 voog	25
4.4. HeO meetod vs pimekambri meetod	25
4.5. HeO mullagaaside seos keskkonnaparameetrite ja mullakeemiaga	26
5. Kokkuvõte	27
Kasutatud kirjandus	28
Lisa 1	30
Lisa 2	31
Tänuavaldused	33

Sissejuhatus

Looduslikud madalsood on minerotroofsed märgalised ökosüsteemid, millel on kõrge veetase. Turbapinnas sisaldab suurtes kogustes orgaanilises vormis lämmastikku ja süsinikku (Münchmeyer, et al, 2000). Sood on tähtsad kasvuhoonegaaside ringluse pärast. Juba ainult boreaalses ja subarktilises vööndis olevates soodes arvatakse olevat $270 - 370 \times 10^{15}$ g C, seega mõjutavad sood suurel määral süsinikuringet. Looduslikes soodes akumuleerub CO₂, samas eritub CH₄. Kuna inimeste arv Maal on kasvanud ning toiduvajadus on suurenenud, siis otsitakse järjest enam pinda põllumajanduse jaoks. Madalsood on rikkad toitainete poolest ning neid kuivendatakse, et rajada põllud. Soid kuivendatakse ka metsanduse ja turbatööstuse eesmärgil. Kuivendamine aga rikub looduslikku tasakaalu. Kuivendamine muudab soo süsinikureservuaarist süsinikueritajateks. Turbas kinni olev orgaaniline süsinik mineraliseerub ning eritub CO₂. Samas vähenevad kuivendamisel soode CH₄ emissioonid või muutvad emissioonid üldse negatiivseks, ehk CH₄ seotakse, kuid see ei kompenseeri atmosfääri kaduvat süsinikku CO₂ näol. Veelgi enam hakkab kuivendatud madalsoost erituma rohkem N₂O (Järvi Järveoja, 2011; Karki, et al, 2015). Kõik mainitud gaasid on olulised kasvuhoonegaasid.

Umbes 2/3 kogu N₂O emissioonidest on seotud maaharimisega. Ka CH₄ puhul mõjutavad pinnased tugevalt atmosfäärse CH₄ kontsentratsiooni. On hinnatud, et märgalad moodustavad ~1/3 kogu atmosfäärse CH₄ allikatest. Seevastu hästiõhustatud pinnased on atmosfäärse CH₄ sidujateks. CO₂ korral on pinnased peamised allikad tänu autotroofsele (taime juur) ja heterotroofsele (orgaanilise aine mikroobne lagunemine ning ka pinnasefauna) hingamisele. Siiski ökosüsteemi tasandil võivad pinnased käituda nii netoallikatena kui ka –sidujatena, kuna tuleb arvesse võtta ka taime primaarproduktiooni (CO₂ fikseerimine atmosfäärist fotosünteesi läbi). On hästi teada, et pinnased kuni 1 meetrini sisaldavad globaalselt umbes 3 korda rohkem süsinikku, kui on praegu atmosfääris. Seega maakasutuse ja –harimise muutus kui ka kliimamuutused mõjutavad taimede primaarproduktiooni ja pinnase orgaanilise aine mineralisatsioonidünaamikat. (Butterbach-Bahl, et al, 2016).

Kuna pinnaste kasvuhoonegaaside emissioonid on põhiliselt mikrobioloogilise päritoluga, siis muutused keskkonnatingimustes mõjutavad otseselt kasvuhoonegaaside vahetust maapinna ja atmosfääri vahel. Näiteks üleujutamine põhjustab anaeroobsed tingimused ning aeglustab või peatab aeroobsed lagunemisprotsessid. (Butterbach-Bahl, et al, 2016).

Kasvuhoonegaaside mõõtmiseks on palju erinevaid meetodeid: turbulentse õhuvoo meetod (*eddy covariance*; Baldocchi, et al, 2014), kambrimeetod (Butterbach-Bahl, et al, 2016) ja HeO meetod (Butterbach-Bahl, et al, 2002). Turbulentse õhuvoo puhul mõõdetakse hetkelist kovariantsust õhu ülesse ja alla liikumisel ning gaaside kontsentratsiooni nendes õhupakettides. Kambrimeetodi puhul asetatakse kamber maa pinnale ning kogutakse kambrist gaasiproov proovipudelisse. HeO meetodi korral võetakse maapinnast erinevatelt sügavustelt mullaproovid, mis viiakse siis laborisse analüüsimiseks – mullaproovi atmosfäär vahetatakse HeO seguga ning siis mõõdetakse gaasivood. HeO meetodi eeliseks on see, et saab mõõta ka N₂ emissioone.

Antud töö eesmärk on võrrelda kahte kasvuhoonegaaside emissiooni mõõtmisemeetodit: staatiline pimekambri meetod ja HeO meetod ning leida HeO meetodil CH₄, N₂O ja N₂ voogude mõõtmiseks sobiv mullakihi sügavus ning piisav mullaproovide arv. Töös uuriti kasvuhoonegaase Aardlapalu poldril madala veetaseme tingimustes. Töö esimene hüpotees on, et HeO meetodiga mõõdetud N₂O emissioonid on väiksemad pimekambri meetodil saadud väärtustest. Teine hüpotees on, et HeO meetodiga saadud N₂O emissioonid ja CH₄ sidumine on suuremad ülemisest mullakihist võetud proovides ning N₂ ja CH₄ emissioonid suuremad sügavamas kihist võetud proovides.

1. Kirjanduse ülevaade

1.1. Madalsood

Üldiselt on soo maastik, kus rohke vee ja vähese hapniku tõttu ei lagune orgaaniline aine täielikult ära, mis siis ladestub turbana. Sood levivad kohtades, kus on isegi ainult lühiajalised turbatekketingimused, ning hõlmavad enda alla ~3% maismaa- ja mageveepinnast. (Järvi Järveoja, 2011).

Madalsood on aga minerotroofsed turbaalad, mis on suuresti põhjaveetoitelised, sisaldades püsivaid allikaid. Kõige silmatorkavam aspekt seoses madalsoohüdroloogiaga on suhteliselt konstantne veetase turbakünkas ja nõlvamadalsoode osades, kus põhjavee eraldumine on nähtav. Kasvuhooajal on looduslikud madalsood veega küllastunud ning veetasemed fluktureeruvad vähe, hoides taimejuuri pidevalt vees. Veehulk, mida madalsoo vabastab pinnaveekogudesse, varieerub märgatavalt. Mõnedel aladel on suurel hulgal vett, mis koondub allikateks, ning mõnedel aladel esineb vähe põhjavee vabastust pinnaveekogudesse. Eelöeldu oleneb vee sisse- ja väljavoolu tasakaalust, mida kontrollivad regionaalsed hüdrogeoloogilised ja kliimaatilised tingimused. Väiksemate veeallikate puhul ei pruugi esineda pidevat veega küllastumist, mis on vajalik turba moodustumiseks. Kui evapotranspiratsiooni määr on kõrge ja põhjavee toide on väike, siis veetasemed võivad langeda sesoonselt. Madalsoos, kus veetoide on kliimaatilist või antropogeenselt vähenenud, võib esineda madalam veetase, mis põhjustab turba lagunemisprotsesside kiirenemist. Kui madalsoo on veega küllastunud, siis esineb vee immitsemist ning võivad tekkida allikad ning toimub orgaanilise materjali akumulatsioon tänu anoksilistele tingimustele. Üldiselt madalsood ilmnevad stratigraafiliste ja/või topograafilistel murrangutel, kust põhjavesi välja kiildub. Madalsoode turvas koosneb üldiselt tarnast ja/või lõikheinast (Amon, et al, 2002).

Turbaalade levik ei ole just kõige suurem, aga neil on oluline koht globaalses süsinikuringes, kuna süsinikuvaru juba ainult boreaalses ja subarktilises vööndis on $270 - 370 \cdot 10^{15}$ g C (Järvi Järveoja, 2011).

Soode kuivendamine ja kasutamine põllumajanduslikel, metsanduslikel ja turba kaevandamise otstarvetel (tänapäeval 20% Maa soodest) põhjustavad soode muutumist süsinikusidujatest süsinikuallikateks. Looduslikud sood seovad CO₂ ning emiteerivad CH₄ ja ka natuke N₂O, muutes globaalset kliimat. Kui soo kuivendatakse või kuivab kliima muutumise pärast, siis CO₂ ja N₂O vood suurenevad ning CH₄ oma väheneb. Veel sõltuvad kuivendatud soode kasvuhooonegaaside emissioonid sellest, kas taimestik seob rohkem süsinikku kui tuleb

mullast lagunemisprotsesside tõttu. Kasvuhoonegaaside emissioonid olenevad üldiselt kliimast, sellest kas on tegemist madal soo, siirdesoo või rabaga, ning sellest kui tugevalt on sood kuivendatud. Looduslikes soodes on CO₂ ja CH₄ emissioonid suuresti vahelduvad ja olenevad paikkonnast ja selle kliimaoludest. Metaani eritavad veerohked turbamullad. Kuivendamisel pääseb rohkem hapniku turbasse, mis põhjustab CH₄ tootmise langust ning algab CH₄ sidumine metanotroofide poolt. Looduslikes soodes emiteerub N₂O vähe ning ainult soodes, kus on rohkem toitaineid ning kus on nitrifikatsiooni või denitrifikatsiooni jaoks vajalikud tingimused olemas. Kuivendamine aga soodustab N₂O teket, sest mikroorganismid saavad hapnikku ja mineraalset lämmastikku paremini kätte. Samas võib N₂O vood jääda väikesteks ka peale kuivendamist, sest need olenevad sellest, kui palju on turbas lämmastikku. Rohkem lämmastikku on madal- ja siirdesoodes ja vähem rabades. Kokkuvõtvalt muutuvad sood pärast kuivendust süsinikuallikaks ning ei aita ka see, et CH₄ vood vähenevad, kuna CO₂ emiteerub siiski niipalju rohkem (Järvi Järveoja, 2011).

Pinnas-atmosfäär protsessid on kahesuunalised. Vaadeldakse CO₂, CH₄ ja N₂O netoproduksiooni, mis koosneb nii produktsioonist kui ka tarbimisest (Butterbach-Bahl, et al, 2016).

Antud töös uuriti kasvuhoonegaase Aardlapalu poldrilt, mis oli enne poldri rajamist madal soo. Poldrisüsteemid on üldiselt tammidega piiratud kinnised alad, et kaitsta madalamaid alasid üleujutuste eest. Poldrid on maailmas laialt levinud madalamatel maa-aladel veesüsteemide ümber ja on väärtuslikud põllumajanduslikud maad tänu nende viljakusele (Huang, et al, 2016)

1.2. Lämmastikuühendid ja nende ringlus

Eelmisel sajandil on inimkond dramaatiliselt suurendanud reaktiivse lämmastiku ehk keemiliselt aktiivse lämmastiku kogust biosfääris, kiirendades globaalset lämmastikuringet kahe korra võrra. Vaadeldaval kiirenenud lämmastikuringel on mitu ohtlikku tagajärge keskkonnale, nagu näiteks eutrofeerumine, hapestumine ja õhusaaste. Kui reaktiivne lämmastik on tekkinud (läbi väetiste tootmise, põletamisprotsesside ja bioloogilise N₂ sidumise), võib see jääda globaalsesse keskkonda päevadest kuni sajanditeni, seejuures langedes erinevates vormides allavoolu ja allatuult läbi biosfääri, hüdrofääri ja atmosfääri. Peamine viis, kuidas reaktiivne lämmastik inaktiveerub, on selle muundumine keemiliselt stabiilsesse vormi, N₂, läbi denitrifikatsiooni. Denitrifikatsioon on fakultatiivne anaeroobne protsess, kus nitraat (NO₃⁻) redutseerub nitritiks (NO₂⁻), siis NO-ks, siis N₂O-ks ja lõpuks N₂-

ks. Denitrifikatsiooni seostatakse N_2 , N_2O ja NO tootmises pinnastes, setetes ja veekogudes. Viimased kaks on primaalselt või sekundaarselt aktiivsed kasvuhoonegaasid, mõjutades atmosfääri keemilist koostist ja globaalset soojenemist (Wang, et al, 2011). N_2O mõjutab kiirgusbilanssi 298 korda rohkem kui CO_2 (Järvi Järveoja, 2011) ning põhjustab osoonikihi hõrenemist. NO katalüüsib maapinnalähedase osooni produktsiooni, mis on kahjulik inimese tervisele ja taimestikule ning aitab kaasa happevihmade tekkele ja eutrofeerumisele. Põhilisteks NO ja N_2O allikateks on mikroobne nitrifikatsioon ja denitrifikatsioon. Kui N_2O emissioonid tulenevad mõlematest protsessidest, olenedes substraadi olemasolust, pH-st ja pooride veetäidetusest, siis NO emissioone arvatakse olevat põhjustatud peamiselt nitrifikatsioonist (aeroobne), mis on denitrifikatsioonile vastupidine protsess (Loick, et al, 2015).

1.3. Kambrimeetod kasvuhoonegaaside mõõtmiseks

Kambrimeetod on üks enimkasutatavaid viise, kuidas mõõta kasvuhoonegaaside emissioone, kuna see on odav, ei vaja elektrit (va automatiseeritud süsteemid) ning võimaldavad gaasiproove salvestada hilisemaks analüüsiks. Kambrimeetod on sobiv uurimaks erinevaid käsitusi (nt väetised ja vilja istutamise katsed) ja kasvuhoonegaaside emissioonide muutust maakasutuse muutusel. Siiski peab olema ettevaatlik, et saada korrektseid andmeid, sest kambri paigaldamine häirib keskkonnatingimusi ja mõõdetud vood ei pruugi tingimata kajastada õigesti kasvuhoonegaaside emissioone (Butterbach-Bahl, et al, 2016).

On kahte sorti kambreid: dünaamilised ja staatilised. Dünaamiliste puhul vahetatakse õhk kambri suures kiirusel ($>1-2$ korda kambri ruumalast minutis) ja vood arvutatakse gaasikontsentratsioonide erinevusest sisselaske ja väljalaske juures ning siis korrutatakse see gaasi ruumala vooga, seejuures võttes arvesse pindala, mida kamber katab. Staatilised kambrid on gaasitihedad, ilma sunnitud õhuvahetusega ning üldiselt neid ventileeritakse, et kambri ruumi ja üldine õhurõhk oleks võrdne. Ventileerimisvooliku ruumala peab olema suurem kui gaasi ruumala, mida võetakse igal proovivõtul (Butterbach-Bahl, et al, 2016).

Staatilisi kambreid tavaliselt pannakse rõngale, mis on vähemalt nädal enne voogude mõõtmist $\sim 0,02-0,15$ m maapinda sisestatud, et vältida pinnase keskkonnatingimuste häirimist. Kui kamber on suletud õhutihedalt rõngale, hakkavad kambri ruumi kontsentratsioonid muutuma, kas vähenedes (kui pinnas käitub netosidujana) või suurenedes (kui pinnas käitub netoallikana). Gaasivoo täpseks kalkulatsiooniks tuleb võtta kindlate intervallidena (näiteks 0, 10, 20, 30 minuti pärast peale sulgemist) soovituslikult vähemalt neli

gaasiproovi piki mõõtmisperioodi. Staatiliste kambritega saab mõõta peale pinnase N_2O , CH_4 ja CO_2 voogude ka ökosüsteemi CO_2 netovahetust. Viimase jaoks on vaja kasutada läbipaistvaid kambreid ning peab korrigeerima voogusid vastavalt fotosünteesiliselt aktiivse kiirguse ja temperatuuriga (Butterbach-Bahl, et al, 2016).

Antud töös kasutati staatilist pimekambrit.

1.4 HeO meetod N_2 , N_2O ja CH_4 emissiooni mõõtmiseks mullast

HeO meetod põhineb mulla atmosfääri vahetamisel N_2 vaba atmosfääriga, lubades otse mõõta N_2 emissiooni mullast (denitrifikatsioon). See meetod töödati välja 1970ndatel, et mõõta N_2O ja N_2 denitrifikatsiooni ajal väikestes ümberpakitud pinnaseproovides anaeroobsetes tingimustes heelium/argoon atmosfääris (Wang, et al, 2011). Kõigepealt vahetatakse algne õhk HeO seguga ning siis mõõdetakse gaaskromatograafiaga mullaproovidest N_2 ja N_2O vood. Mõõtmine toimub välitingimustele vastavates temperatuuri- ja niiskuseludes (Mander, et al, 2014).

HeO meetodi eeliseks on see, et on võimalik mõõta ka N_2 emissioone (denitrifikatsiooni lõpp-produkt), mida kambri meetodiga teha ei saa, sest atmosfääris on peaaegu 80% N_2 , mis liigub difusiooni teel kambresse ning segab adekvaatse mõõtmistulemuse saamist. HeO meetod on ka üks täpsemaid meetodeid, erinevalt näiteks atsetüleen meetodist (denitrifikatsiooni viimane faas N_2O -st N_2 -ni blokeeritakse), mis annab tugevasti allahinnatud tulemusi (Mander, et al, 2014). N_2 mõõtmiseks on ka teisi meetodeid, nagu näiteks stabiilse ^{15}N isotoobi kasutamine ja radioaktiivse ^{13}N isotoobi kasutamine, aga nendel on omad probleemid. ^{15}N meetodi puhul peab süsteemi lisama märgatavates kogustes märgistatud materjali. See võib põhjustada pinnases tõsise häiringu, stimuleerida mikroobset N ringlust, on vähetundlik ning vajab kalleid instrumente (mass-spektromeeter). Küll aga ^{13}N meetod on väga tundlik, siis seda ei kasutata laialdaselt, kuna ka see meetod vajab tohutult kalleid instrumente. Seetõttu ongi HeO meetod optimaalne, kuna see ei lõhu ja pole vaja kasutada märgistatud materjali ning inhibiitoreid (Butterbach-Bahl, et al, 2002).

Peamised puudujäägid on järgmised: a) N_2 vaba atmosfääri loomiseks on vaja aega; b) madal N_2 voogude detekteerimise tundlikkus (emissioone vähe denitrifitseerivatest ökosüsteemidest ei ole võimalik täpselt detekteerida ja kogust määrata); c) inkubatsioonianuma gaasipidavus. Olenevalt pinnase tekstuurist, niiskuse sisaldusest ja pinnaseproovide ruumalast võib pinnase atmosfääri täielik vahetus aega võtta mitu päeva. N_2 difusiooni atmosfäärist mõõteanumasse minimiseerimine on ülioluline, et kindlustada, et mõõdetud N_2 suurenemine on ikkagi

põhjustatud denitrifikatsiooni poolt (Wang, et al, 2011; Butterbach-Bahl, et al, 2002). Veelgi enam, antud meetod vajab palju manuaalset tööd ning rikub uurimisala pinnast (Tingting Liao, et al, 2013).

1.5 Kasvuhooneefekt

Kasvuhooneefekt põhineb protsessil, kus kasvuhoonegaasid neelavad maapinnalt kiirgavat infrapunakiirgust, soojendades seeläbi atmosfääri ja maapinda. Põhilisteks kasvuhoonegaasideks on CO_2 , CH_4 ja N_2O . Kui CO_2 globaalse soojenemise potentsiaal loetakse üheks, siis CH_4 ja N_2O on see vastavalt 25 ja 298. Globaalse soojenemise potentsiaal näitab, kui suurt kasvuhooneefekti üks kasvuhoonegaasi molekul põhjustab võrreldes ühe CO_2 molekuliga. Ehk siis üks CH_4 molekul põhjustab 25 korda rohkem kasvuhooneefekti, kui üks CO_2 molekul, ning üks N_2O molekul vastavalt 298 korda rohkem (Järvi Järveoja, 2011).

2. Materjal ja metoodika

2.1. Uurimisala

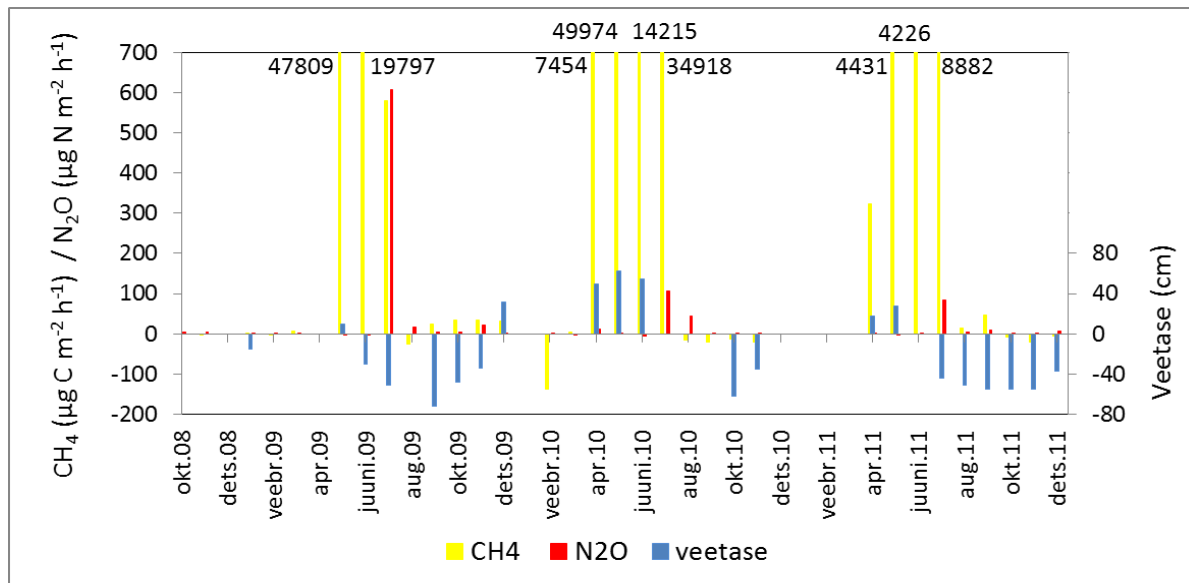
Gaasimõõtmised toimusid Aardlapalu poldril (vt. tabelit 1). See on 1018 ha suur ning asub kagu Eestis (Tartu maakond, Reola; 58°18" N, 26°44" E). Aardla polder (rajatud 1974.a.) asub Emajõe lammil, Ropka ja Reola vahelisel tasandikul. Polder asub 8 km ulatuses piki Reola-Konsu ürgorgu. Esineb kõrge põhjaveetase, sest ala on tasane ja vee äravool alalt on väga väike. Enne poldri rajamist ujutas Emajõgi seda maa-ala vahelduva eduga üle ning oli kasutamata. Kogu ala on kaetud kuivendussüsteemiga. Aprillis ja mais on ala veega üleujutatud lumesulamisvetest. Veetase on umbes 75 cm kuni 1 m ülevalpool maapinda. Kesksuvel, tavaliselt juuli lõpus ala kuivendatakse ja sellest moodustuvat rohumaad kasutatakse heinateoks.

Polder on seotud Emajõega läbi Savijõe, sest poldri väljavool on Savijõkke. Kui regulaator on avatud, siis sõltub poldri veetase Emajõe veetasemest. Poldri tegemisel rajati Porijõe poldrist kõrvale juhtimiseks Konsu kanal, mis võib muuta poldri veetaset läbi infiltreerumise. Kui poldri veetase on madalam kui Konsu kanalis, võib vesi läbi poldri tammi filtreeruda.

Tabel 1. Aardlapalu poldri mullatüüp, turba lämmastiku ja süsiniku sisaldus ning keskmine veetase (Kaido Soosaar, 2010; Kobras AS, 2011).

Näitaja	
Pinnase tüüp	sapric histosols (eutric)
A-horisoni sügavus	0,2 m
C _{üld}	16,28%
N _{üld}	1,39%
C/N	11,71
Keskmine veetase	+0,63-<1 m

Aardlapalu poldril oktoobrist 2008 kuni detsembrini 2011 a. mõõdetud kasvuhoonegaaside ja veetasemete tulemused on toodud joonisel 1 (Kaido Soosaar, 2010; Martin Maddison, avaldamata andmed). Veetase allpool maapinda esines 2009. aasta juunist kuni novembrini ning ka 2010. aasta oktoobrist novembrini. Veetase ülevalpool maapinda esines 2009. aasta detsembris ning 2010. aasta aprillist kuni juunini.



Joonis 1. CH₄ ja N₂O vood ning veetase Aardlapalu poldril oktoobrist 2008 kuni detsember 2011 (Kaido Soosaar, 2010; Martin Maddison, avaldamata andmed).

2.2. Kambrimeetodil CH₄ ja N₂O mõõtmine

Staatilise pimekambri meetodiga mõõdeti viiest kohast ~25 m² suuruselt ringikujuliselt alalt kolme päeva jooksul (11.07 - 14.07.2016) nii, et mõõdeti iga hommik ja õhtu. Gaasiproovid koguti 50 ml eeevakueeritud (0,3 mbar) klaaspudelitesse. Gaasiproovide kogumine viidi läbi 1 h jooksul 15-minutilise intervalliga nii, et igast kambrist saadi 5 proovi – esimene nn 0proov võeti kohe peale kambri paigaldamist, teine 15 minuti, kolmas 30 minuti, neljas 45 minuti ning viies 1 h möödudes proovivõtu algusest. Mõõtmistel kasutati valgeid 65,5-liitrise mahuga PVC-kambreid (kõrgus 40 cm, diameeter 50 cm), mis asetati õhukindlalt 15 cm sügavuselt mulda vajutatud veetihendiga plastikringi peale. Kambrite värvus oli valge, et vältida soojenemist. Enne mõõtmisi kambrid õhutati (vt. Lisa 1 pilt 1.)

Kambrimeetodi proovide CH₄ ja N₂O sisaldus proovides määrati elektron-detektori (ECD) ja leekionisatsiooni detektoriga (FID) varustatud gaas-kromatograafi (Shimadzu 2014 GC) abil Tartu Ülikooli laboris. Gaasivoo intensiivsus arvutati gaasikontsentratsiooni lineaarse muutuse alusel ($R^2 > 0,77$ ($n=5$); $p < 0,05$) võttes arvesse pimekambri ruumala ja kambriga kaetud pindala.

2.3. HeO meetodil CH₄, N₂O ja N₂ mõõtmise

Kambrimeetodi rõngaste lähedalt võeti mullapuuriga (Ø9cm) viielt sügavuselt (0-6; 6-12; 12-18; 18-24; 24-30 cm) mullakehad, mis pandi terassilindrisse (h: 6 cm; Ø 7 cm). Silindrite otsad suleti plastkaantega. Proovikehad hoiustati jahekapis +4 °C juures (vt. Lisa 1 pilt 2.)

CH₄, N₂O ja N₂ voogude mõõtmiseks paigutati terassilindrid ühest otsast avatuna õhukindlatesse silindritesse, millest lasti läbi kunstlik gaasisegu (0,3 ppb N₂O, 1,8 ppm CH₄, 6 ppm N₂, 350 ppm CO₂ ja üle jäänud He). Proovide läbipesu kestis 36 tundi, et tagada kogu mullapoorides oleva algse õhu vahetumine uue kunstliku gaasiseguga.

Voolutamise ajal mõõdeti gaas-kromatograafia silindrite väljavoolus gaasikontsentratsiooni. Läbipesemise silindrid asuvad kliimakapis, kus saab muuta temperatuuri -5 – 60 °C. Proovide läbipesu toimus samal temperatuuril, mis oli mullatemperatuur igal sügavusel välitingimustes.

N₂ mõõtmiseks suleti silindrid kaheks tunniks ning mõõdeti kontsentratsiooni muutus (0; 40; 80 ja 120 minutit). N₂O ja CH₄ mõõtmiseks võeti täiendavad gaasiproovid kahe tunni jooksul (0; 40; 80 ja 120 minutit) eelvakueeritud 50 ml suurustesse gaasipudelitesse. Proovid analüüsiti sama gaaskromatograafia, millega analüüsiti kambrimeetodiga kogutud õhuproovid.

Gaasivoog arvutati kontsentratsiooni lineaarse ($R^2 > 0,81$ ($n=4$); $p < 0,1$) muutuse alusel.

Arvutati N₂O ja N₂ suhe (N₂O/N₂), mis iseloomustab denitrifikatsiooni protsessi kulgemist.

2.4. Keskkonnaparametrid ja keemiaanalüüs mullaproovidest

Iga mõõtmiskord mõõdeti mullatemperatuur 10, 20, 30, 40 cm sügavusel mullaniiskus ja elektrijuhtivus. Uurimisala põhjaveetase mõõdeti alale paigutatud vaatluskaevust.

Õhkkuivad proovid peenestati, sõeluti läbi 2mm sõela. Ekstraheerimine H₂O-ga, analüüsiti filtreeritud proovi (poorsus 0,45µm)

Mullaproovidest analüüsiti järgmised keemianäitajad: lahustunud üldorgaaniline süsinik (DOC), lahustunud anorgaaniline süsinik (DIC), lahustunud üldsüsinik (DC), lahustunud üldlämmastik (DN), üldine süsinik (TC), üldine anorgaaniline süsinik (TIC), üldine orgaaniline süsinik (TOC).

2.5. Andmeanalüüs

Statistiline andmeanalüüs teostati programmi Statistica 7.0 (*Statsoft Inc.*). Tulemuste visualiseerimiseks, korrastamiseks ning süstematiseerimiseks kasutati lisaks programmi MS Excel 2007.

Kasvuhoonegaaside emissioonid ja registreeritud keskkonnaparameetrid ei vastanud normaaljaotusele, mistõttu kasutati andmeanalüüsil mitteparameetrilisi meetodeid. Muutujate normaaljaotuse kontrollimiseks kasutati Kolmogorov-Smirnovi, Lillieforsi ja Shapiro-Wilki teste.

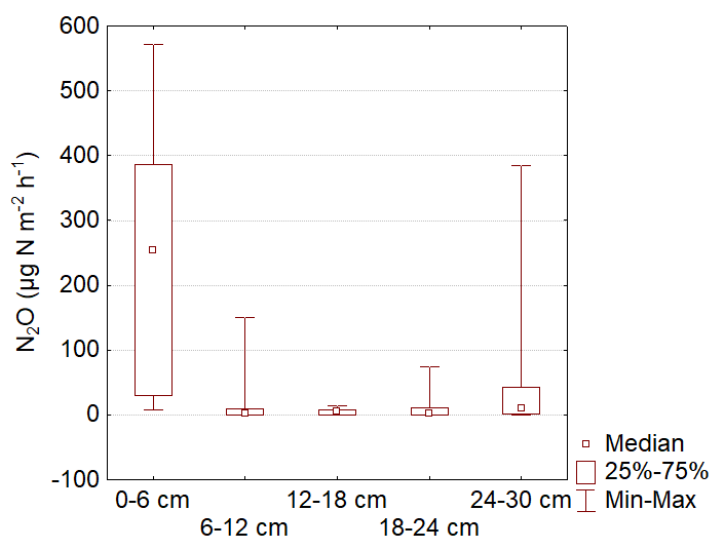
Mitteparameetristest testidest kasutati erinevatelt mõõtmiskohtadest ja -sügavustes mõõdetud kasvuhoonegaaside emissioonide erinevuse hindamiseks Kruskal-Wallis ANOVA testi ning erinevate keskkonnaparameetrite seoste analüüsil rakendati Spearmani astakkorrelatsiooni.

Tulemuste varieeruvuse hindamiseks arvutati variatsioonikordaja.

3. Tulemused

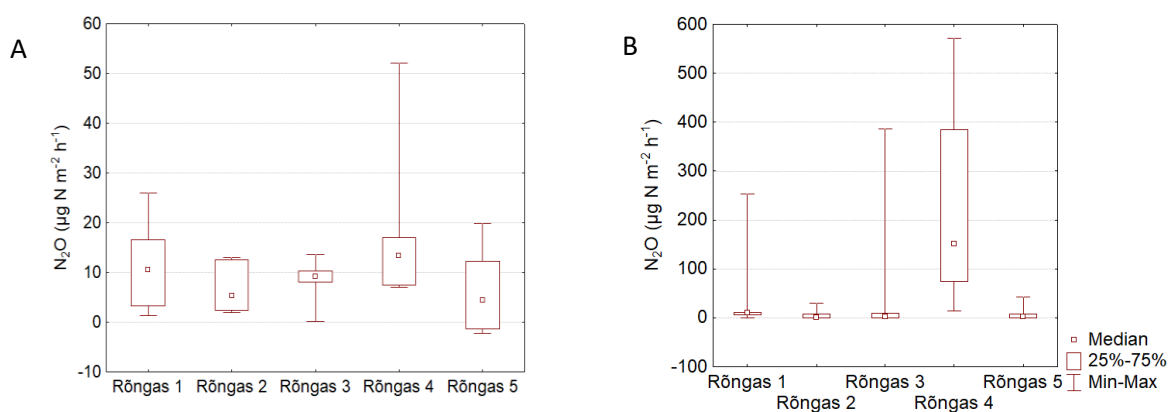
3.1. N₂O voog

HeO meetodiga mõõdetud N₂O emissioonid jäid vahemikku -0,2 kuni 571,6 µg N m⁻² h⁻¹ (vt. joonist 2).



Joonis 2. HeO meetodil mõõdetud N₂O voo mediaanväärtused, 25- ja 75-protsentiilid ning minimaalsed ja maksimaalsed väärtused erinevatelt sügavustelt.

Kõige suuremad väärtused jäid 0-6 cm kihti, kus esines ka ainuke kõrge mediaanväärtus. Ka esines piik 24-30 cm kihis (384,9 µg N m⁻² h⁻¹) ja 6-12 cm kihis (150,6 µg N m⁻² h⁻¹). Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi ükski sügavus ei erinenud üksteisest statistiliselt usaldusväärselt (vt. joonist 3).



Joonis 3. Kambrimeetodil (A) ja HeO meetodil (B) mõõdetud N₂O voo mediaanväärtused, 25- ja 75-protsentiilid ning minimaalsed ja maksimaalsed väärtused.

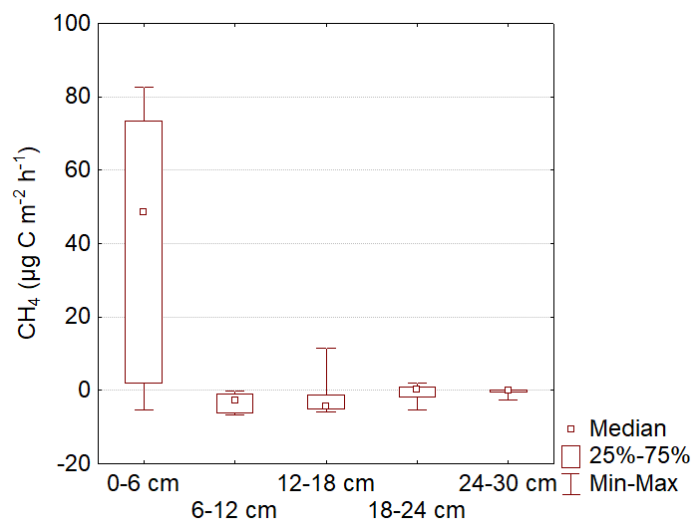
Kõige suuremad HeO meetodil mõõdetud N₂O väärtused esinesid 4. rõnga juures, kus ka esines ainuke kõrge mediaanväärtus. Suuremad maksimaalsed väärtused esinesid ka 1. ja 3. rõnga juures. Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi ükski koht ei erinenud üksteisest statistiliselt usaldusväärselt.

Kambri meetodiga mõõdetud N₂O emissioonid jäid vahemikku -2,21 kuni 52,16 µg N m⁻² h⁻¹. Nagu HeO meetodi korral, siis ka kambri meetodil esinesid suuremad väärtused 4. rõnga juures. Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi ükski koht ei erinenud üksteisest statistiliselt usaldusväärselt.

Ajaliselt esinesid suuremad kambriproovidest N₂O väärtused esimesel öhtul. Mõõtekordade mediaanid langevad igal järgneval mõõtekorral peaaegu lineaarselt (öhtu 1, hommik 1, öhtu 2, hommik 2, öhtu 3, hommik 3). Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi erines 1. öhtu 3. hommikust statistiliselt usaldusväärselt. Kõiki hommikuid kõigi öhtutega võrreldes esinesid suuremad väärtused öhtutel. Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi ei erinenud kõigi hommikute väärtused kõigi öhtute väärtustest statistiliselt usaldusväärselt.

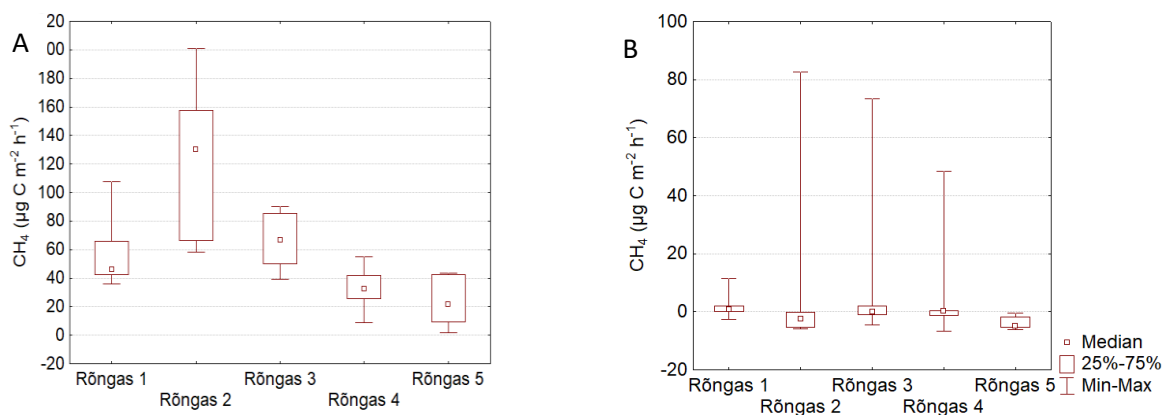
3.2. CH₄ voog

HeO meetodiga mõõdetud CH₄ emissioonid jäid vahemikku -6,7 kuni 82,7 µg C m⁻² h⁻¹ (vt. joonist 4)



Joonis 4. HeO meetodil mõõdetud CH₄ voo mediaanväärtused, 25- ja 75-protsentiilid ning minimaalsed ja maksimaalsed väärtused erinevatel sügavustel.

Suuremad väärtused jäid 0-6 cm kihti, kus esines ka ainuke kõrge mediaanväärtus. Teistes kihtides kõikis mediaanväärtus 0 ümber. Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi ei erinenud ükski sügavus üksteisest statistiliselt usaldusväärselt (vt. joonist 5).



Joonis 5. Kambrimeetodil (A) ja HeO meetodil (B) mõõdetud CH₄ voo mediaanväärtused, 25- ja 75-protsentiilid ning minimaalsed ja maksimaalsed väärtused.

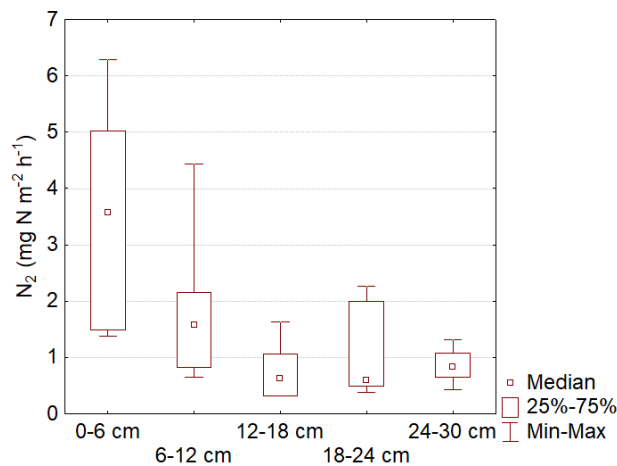
Suuremad maksimaalsed väärtused mullaproovidest esinesid 2., 3. ja 4. rõnga juures. Samas jäid kõikide rõngaste mediaanid ümber 0 kõikumale. Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi ei erinenud ükski sügavus üksteisest statistiliselt usaldusväärselt.

Kambri meetodiga mõõdetud CH₄ emissioonid jäid vahemikku 1,7 kuni 201 µg C m⁻² h⁻¹. Suuremad väärtused esinesid 2. rõnga juures. Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi erines 2. rõngas 4.-st ja 5.-st statistiliselt usaldusväärselt.

Ajaliselt esinesid suurimad väärtused kambriproovidest 3. õhtul. Mõõtekordade mediaanid suurenevad igal järgneval mõõtekorral peaaegu lineaarselt (õhtu 1, hommik 1, õhtu 2, hommik 2, õhtu 3, hommik 3). Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi ei erinenud ükski aeg üksteisest usaldusväärselt. Kõiki hommikuid kõigi õhtutega võrreldes esinesid suuremad väärtused õhtutel. Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi ei erinenud hommik õhtust statistiliselt usaldusväärselt.

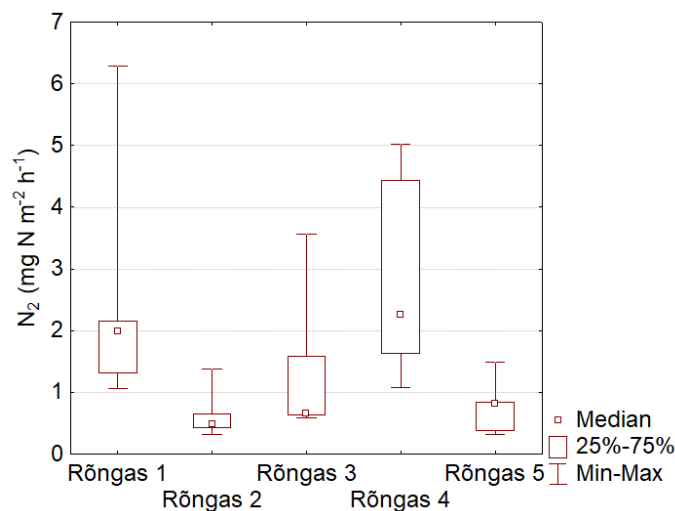
3.3. N₂ voog

HeO meetodiga mõõdetud N₂ emissioonid jäid vahemikku 0,31 kuni 6,28 mg N m⁻² h⁻¹ (vt. joonist 6)



Joonis 6. HeO meetodil mõõdetud N_2 voo mediaanväärtused, 25- ja 75-protsentiilid ning minimaalsed ja maksimaalsed väärtused erinevatel sügavustel.

Kõige suuremad väärtused jäid 0-6 cm kihti. N_2 voogude mediaanid langevad sügavuse kasvades peaaegu lineaarselt. Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi ei erinenud ükski sügavus üksteisest statistiliselt usaldusväärselt (vt. joonist 7).

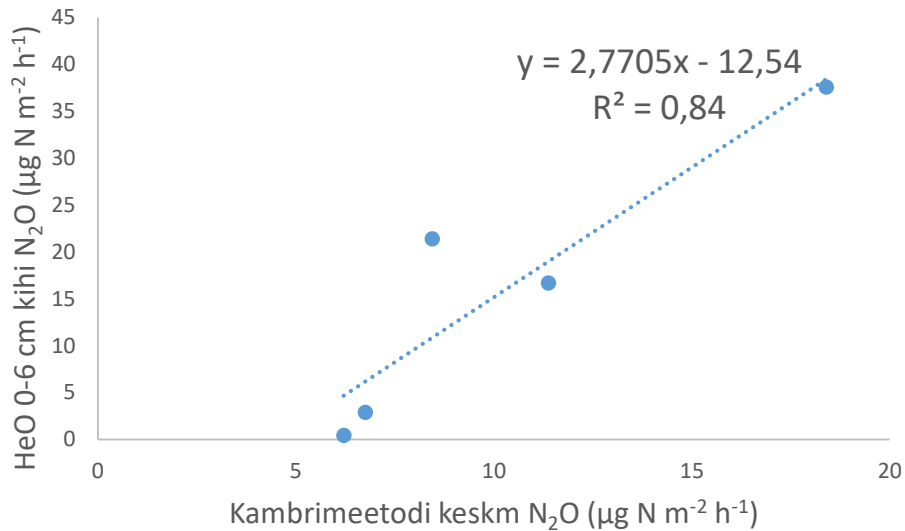


Joonis 7. Kambri meetodil mõõdetud N_2 voo mediaanväärtused, 25- ja 75-protsentiilid ning minimaalsed ja maksimaalsed väärtused.

Suuremad maksimaalsed väärtused esinesid 1., 3. ja 4. rõnga juures. Suuremad N_2 voogude mediaanid esinesid 1. ja 4. rõnga juures. Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi ei erinenud ükski rõngas üksteisest statistiliselt usaldusväärselt.

3.4. HeO meetod vs pimekambri meetod

Spearmani astakorrelatsiooni järgi oli HeO meetodil 0-6 cm kihist mõõdetud N₂O voo ja kambrimeetodil mõõdetud keskmise voo vahel usaldusväärne seos (vt. joonist 8).



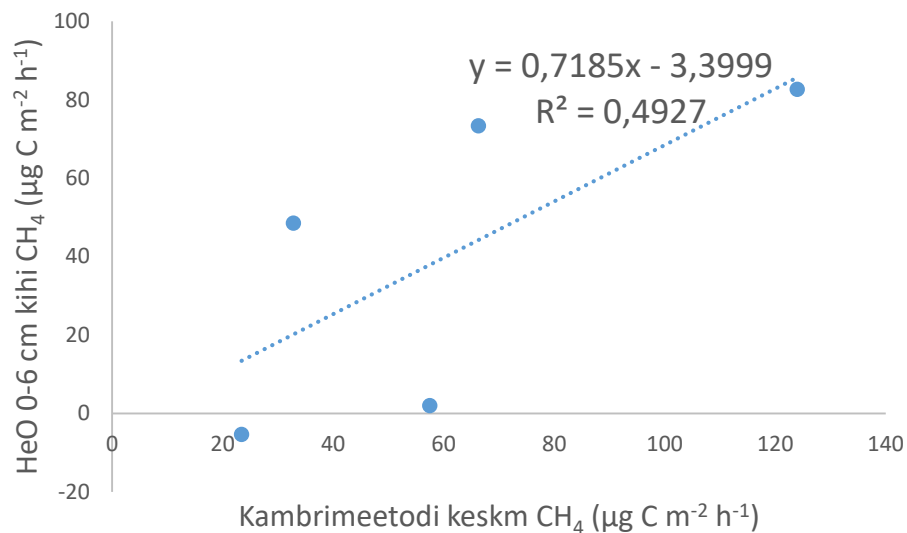
Joonis 8. Kambri meetodil mõõdetud keskmiste N₂O emissioonide seos HeO meetodil mõõdetud 0-6 cm kihi N₂O emissioonidega.

HeO meetodiga saab kirjeldada 84% ulatuses kambrimeetodi tulemused.

N₂O/N₂ väärtused jäid vahemikku 0,00001 – 0,359. Spearmani astakorrelatsiooni järgi ei esinenud keskmise N₂O/N₂ väärtuste ja keskmise pimekambri meetodil mõõdetud N₂O voogude ning sügavuste vahel usaldusväärset seost.

Spearmani astakorrelatsiooni järgi esines usaldusväärne seos HeO meetodil mõõdetud 0-6 cm kihi ja kambrimeetodil mõõdetud keskmise CH₄ voo vahel (vt. joonist 9).

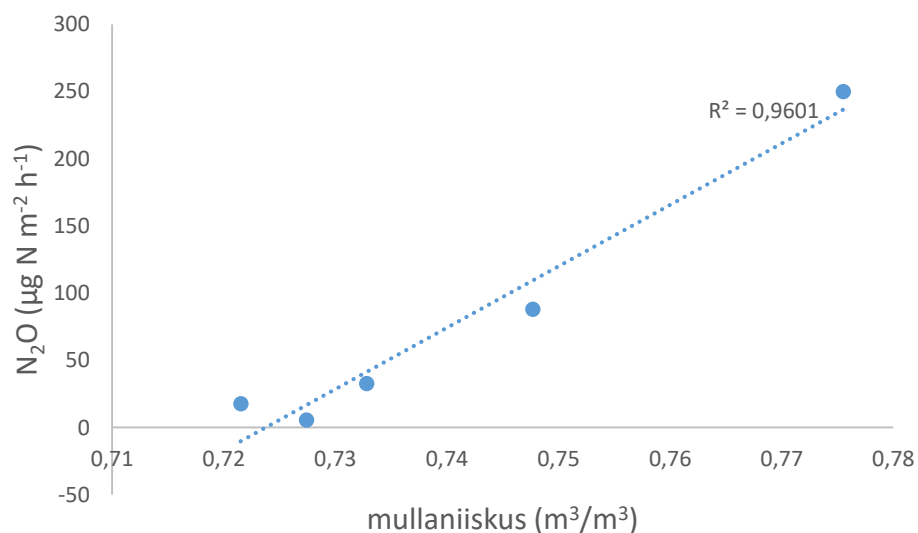
HeO meetod saab kirjeldada 49,3% pimekambri meetodi tulemustest.



Joonis 9. Kambri meetodil mõõdetud keskmiste CH₄ emissioonide seos HeO meetodil mõõdetud 0-6 cm kihi CH₄ emissioonidega.

3.5. HeO mullagaaside seos keskkonnaparameetrite ja mullakeemiaga

HeO meetodil mõõdetud keskmiste N₂O emissioonide ja mullaniiskuse vahel esines lineaarne seos ($R^2=0,9601$)(vt. joonist 10).



Joonis 10. HeO meetodil mõõdetud keskmiste N₂O emissioonide seos mullaniiskusega.

Uurimisala veetase oli kogu mõõtmisperioodi -42 cm maapinnast.

Keskmise N₂O voo ja keskmise mullaniiskuse vaheline lineaarne seos oli ka Spearmani astakkorrelatsiooni järgi usaldusväärne. Ülejäänud gaaside ja keskkonnaparameetrite vahel usaldusväärset seost ei esinenud.

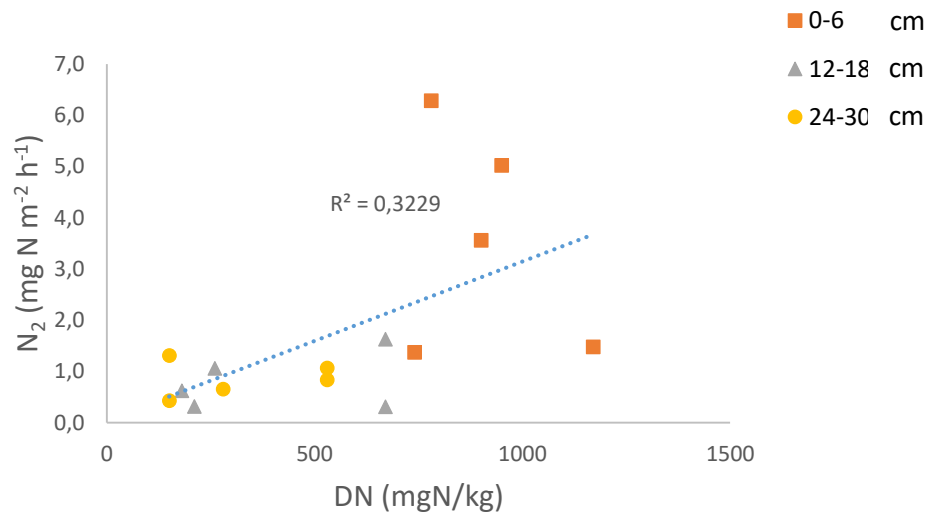
Kruskal-Wallis ANOVA testi järgi erinesid usaldusväärselt järgmised mullakeemia näitajad: DN ja DC kõigil sügavustel ning DC/DN 2. ja 5. rõngas.

CH₄ emissiooni ja mullakeemia vahel usaldusväärsed seoseid ei esinenud (vt. tabelit 2).

Tabel 2. HeO meetodil ning kambrimeetodil mõõdetud gaasivoogude ja mullakeemia parameetritega vahelise seose olemasolu ja puudumine Spearman astakkorrelatsiooni järgi.

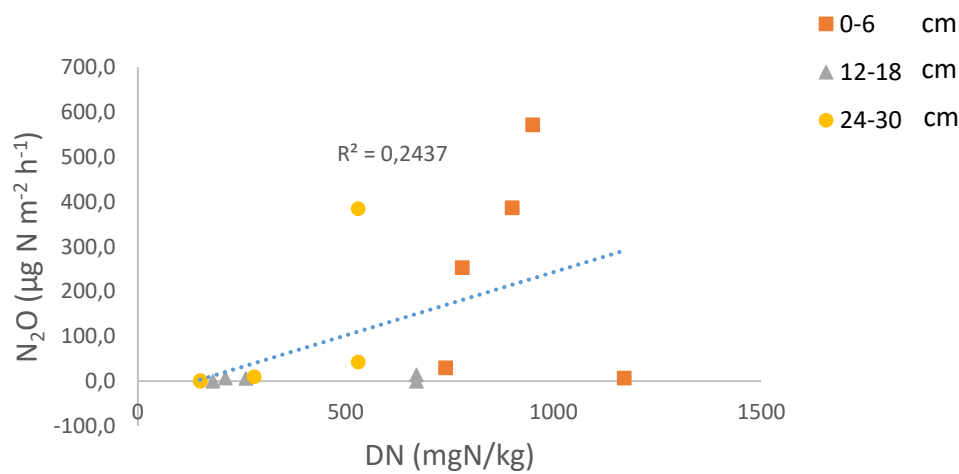
Meetod	gaas	Seos esines	Seos ei esinenud
HeO	CH ₄	-	DN, DIC, DC, DC/DN, DOC, TC, TOC, TIC
	N ₂ O	DN, DC, DOC, TIC	DIC, DC/DN, TC, TOC
	N ₂	DN, DC, DOC, TIC	DIC, DC/DN, TC, TOC
Pimekamber	CH ₄	DN/DC 0-6 cm, DOC 24-30cm, TIC 24-30 cm	
	N ₂ O	-	DN, DIC, DC, DC/DN, DOC, TC, TOC, TIC

Spearmani astakkorrelatsiooni järgi esines usaldusväärne seos N₂ emissioonil lahustunud lämmastiku (DN; vt. joonist 11), lahustunud süsiniku (DC), lahustunud orgaanilise süsiniku (DOC) ja üldise anorgaanilise süsiniku (TIC) vahel.



Joonis 11. N₂ voogude seos lahustunud lämmastikuga (DN) erinevatel sügavustel.

N₂O gaasivool esines Spearmani astakkorrelatsiooni järgi usaldusväärne seos DN (vt. joonist 12), DC, DOC ja TIC vahel.



Joonis 12. N₂O voogude seos lahustunud lämmastikuga (DN) erinevatel sügavustel.

4. Arutelu

4.1. N₂O voog

HeO meetodil 0-6 cm kihist mõõdetud N₂O voo ja kambrimeetodil mõõdetud voo vahel esines lineaarne seos ($R^2 = 0,840$). Seos oli usaldusväärne ka Spearmani astakorrelatsiooni järgi. Kambrimeetodi saadud tulemused on väiksemad kui HeO meetodiga. HeO tulemustega saab kirjeldada pimekambri meetodi tulemused 84% ulatuses (vt. joonist 8).

HeO meetodil mõõdetud kõigi mõõtmiste variatsioonikordaja oli 195%, kambrimeetodil 100%. Seega kambrimeetodil on väiksem hajusus. See tähendab, et HeO meetodil tuleks võtta rohkem proove. Samas on HeO meetodil kõige ülemisest kihist mõõdetud voogudel väiksem varieeruvus (vt. Lisa 2 tabelit 1), seega kui võtta proove ainult kõige ülemisest kihist, siis tuleb võtta vähem proove.

Kuna HeO meetodil mõõdetud 0-6 cm kihi emissioonide variatsioonikordaja on väiksem kui HeO meetodil mõõdetud kõigi mõõtmiste variatsioonikordaja ning suuremad N₂O emissioonid tulid 0-6 cm kihist, siis piisaks, kui võtta HeO meetodiga proove kõige ülemisest kihist. Enam veelgi, tuleks võtta ühest sügavusest rohkem kui 5 proovi, sest proovide hajusus on suur (96%). Usaldusväärse N₂O aastase voo saamiseks tuleks võtta rohkem mullaproove korraga ning mitmeid kordi aasta jooksul, mistõttu HeO meetod selleks ei sobi. HeO meetod on tömahukas, ajakulukas ning sagedase mullaproovide võtmise tulemusena ei jää uurimisalale rikkumata mulda teisteks analüüsideks.

N₂O tekib mullas põhiliselt nitrifikatsiooni ja denitrifikatsiooni läbi. Neid mikroobseid protsesse mõjutavad hapniku sisaldus, mis on seotud mullaniiskusega, ning mineraalse lämmastiku kättesaadavus. Kui veetase alaneb, siis suurenevad nitrifikatsioon ja denitrifikatsioon ning orgaanilise aine lagunemine muutub intensiivsemaks, mis võib suurendada lämmastikuisaldust mullas (Järvi Järveoja, 2011).

Kõige suuremad HeO meetodil mõõdetud N₂O vood tulid 0-6 cm kihist. Selle põhjuseks võib olla see, et mullaniiskuse langedes intensiivistuvad orgaanilise aine lagunemisprotsessid, mille tõttu suureneb lämmastikuühendite sisaldus, mille tulemusena kiirenevad denitrifikatsioon ja nitrifikatsioon (Järvi Järveoja, 2011). Samas on see vastuoluline Butterbach-Bahl et al (2002) tulemustega, kus mullaproovide N₂O emissioonid suurenesid 37.9 µgN m⁻² h⁻¹ (51% mullaniiskuse sisaldus) kuni >790 µgN m⁻² h⁻¹ (107% mullaniiskuse sisaldus) ehk siis suuremad emissioonid tulevad anaeroobsetes tingimustes. Kõrgem veesisaldus suurendab N₂O emissioone tänu kiirenenud denitrifikatsioonile, kuid samas

suurenenud anaeroobsus suurendab N_2 emissioonide osakaalu, kuni lõpuks N_2 on põhiline gaas, mida emiteeritakse (Eickenscheidt, et al, 2014). Richards, et al (2015) järgi ilmnevad maksimaalsed N_2O emissioonid, kui mullaniiskus on 40% ja 60% vahepeal.

On teada, et temperatuur on võtmefaktoriks N_2O voogudel, sest nitrifikatsioon ja denitrifikatsioon mõlemad on mikroobsed protsessid (Eickenscheidt *et al*, 2014). Eickenscheidt *et al*. tulemused näitavad, et N_2 produktsioon suureneb temperatuuri kasvades rohkem kui N_2O produktsioon.

Richards, et al (2015) järgi ilmnevad maksimaalsed N_2O emissioonid, kui mullaniiskus on 40% ja 60% vahepeal, ning maksimaalsed CH_4 emissioonid ilmnevad, kui mullaniiskus läheneb 100%-le.

4.2. CH_4 voog

HeO meetodil mõõdetud CH_4 kõigi mõõtmiste variatsioonikordaja oli 346% ja kambrimeetodil 75% (vt. Lisa 2 tabelit 2). Nii nagu N_2O voogude puhul, siis ka CH_4 puhul on hajusus kambrimeetodil väiksem. Ka see annab märku, et HeO meetodil tuleks võtta rohkem proove.

Antud valemit kasutades kirjeldab üks meetod teist 49,3% ulatuses (vt. joonist 9).

HeO meetodil mõõdetud 0-6 cm kihi CH_4 emissioonide variatsioonikordaja on väiksem kui HeO meetodil mõõdetud kõigi mõõtmiste variatsioonikordaja ning suuremad CH_4 emissioonid tulid 0-6 cm kihist. Sarnaselt N_2O voogude puhul piisaks kui võtta HeO meetodiga proovid kõige ülemisest kihist. Samas tuleks võtta ühest sügavusest rohkem kui 5 proovi, sest tulemuste hajusus on suur (100%).

Mullas toimuvad nii metaani produtseerimine kui ka sidumine. Anaeroobses kihis toodavad metanogeenid metaani. Samas aeroobses kihis tarbivad metanotroofid, kes paiknevad kahe kihi piirpinnal, tekkinud metaani, saades sellelt süsinikku ja energiat (Järvi Järveoja, 2011).

Richards, et al (2015) järgi ilmnevad maksimaalsed CH_4 emissioonid, kui mullaniiskus läheneb 100%-le.

Antud töös esinesid suuremad mullaproovide CH_4 emissioonide väärtused 0-6 cm kihis, mis on vastuoluline, sest selles kihis on mulla veesisaldus kõige madalam ehk siis valitsevad aeroobsed tingimused.

Sarnaselt N_2O -le ei asenda HeO meetod pimekambri meetodit CH_4 aastase emissioonivoogude mõõtmiseks.

4.3. N_2 voog

HeO meetodil mõõdetud kõigi mõõtmiste variatsioonikordaja oli 95% (vt. Lisa 2 tabelit 3).

Ka N_2 voogude puhul on 0-6 cm kihist mõõdetud emissioonide hajuvus väiksem, kui kõigi mõõtmiste variatsioonikordaja ning 0-6 cm kihist tulid suuremad emissioonid. Ka see kinnitab, et piisaks, kui võtta proove 0-6 cm kihist. Kuna N_2 voogude puhul 0-6 cm kihi hajusus on väike (61%), siis 5 proovi antud kihist on piisav N_2 voogude hindamiseks

HeO meetod ongi arendatud just N_2 mõõtmiseks, muud gaasid on teiste meetoditega lihtsam, kiirem ja täpsem mõõta.

Kõige suuremad mullaproovide N_2 vood tulid 0-6 cm kihist (kõige väiksema veesisaldusega kiht). See on vastuoluline, kuna N_2 on denitrifikatsiooni lõpp-produkt, aga denitrifikatsioon toimub anaeroobsetes tingimustes. Eickenscheidt et al (2014) leidsid, et N_2 emissioonid 100% mullaniiskuse juures on vähemalt 10 korda suuremad, kui 83% mullaniiskuste juures. Antud uurimistöö vastuolulist tulemust võib seletada sellega, et 0-6 cm kiht on mikrobioloogiliselt aktiivsem kui sügavamad kihid.

4.4. HeO meetod vs pimekambri meetod

Usaldusväärsete N_2O ja CH_4 aastase voo saamiseks tuleks võtta rohkem mullaproove korraga ning mitmeid kordi aasta jooksul, mistõttu HeO meetod selleks ei sobi. HeO meetod on töömahukas, ajakulukas ning sagedase mullaproovide võtmise tulemusena ei jää uurimisalale rikkumata mulda teisteks analüüsideks. HeO meetod ongi arendatud just N_2 mõõtmiseks, muud gaasid on teiste meetoditega lihtsam, kiirem ja täpsem mõõta.

Kambrimeetodil mõõdetud N_2O ja HeO meetodil mõõdetud $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ suhte vahel usaldusväärset seost ei esinenud. Samuti ei olnud seost sügavusega.

$\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ väga väikesed väärtused näitavad, et denitrifikatsiooni protsess toimub valdavalt lõpuni. Uurimisalal oli küll veetase madal (-42 cm maapinnast), aga mullaniiskus oli piisavalt kõrge, et tagada denitrifikatsiooniks toimumiseks anaeroobsed tingimused.

$\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ suhe võib varieeruda märkmimisväärselt. Selle põhilisteks põhjusteks on pinnase nitraadi kontsentratsioon, redokspotentsiaal, mullaniiskus ja pH. Üldiselt esineb väiksem

$\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ suhe, kui süsinik on hästi kättesaadav. Samas suure nitraadi kontsentratsiooni ja madala kergestilaguneva süsiniku kontsentratsiooni juures N_2O muutus N_2 -ks inhibeerub ja N_2O võib olla ainuke lõpp-produkt (Wang, et al, 2011). $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ suhe väheneb anaeroobsuse suurenemisel, kus põhiliseks protsessiks muutub denitrifikatsioon (Butterbach-Bahl, et al, 2002).

Suuremad gaasivood esinesid mulla ülemisest kihist (0-6cm), kuna värskest surnud taimsest biomassist leostuvad ühendid, mis on kergemini energiaks ja toiduks kasutatav mikroorganismidele. Samuti on üheks põhjuseks see, et ülemine kiht on rohkem mineraliseerunud.

4.5. N_2O mullagaaside seos keskkonnaparameetrite ja mullakeemiaga

N_2O ja N_2 voogudel statistiliselt usaldusväärset seost temperatuuriga ei esinenud. Statistiliselt usaldusväärne seos esines mullaniiskusega. N_2O ja N_2 emissioone võib seletada sellega, et niiskust oli täpselt nii palju, et tekiks nii N_2O , kui ka N_2 . Ehk siis toimuvad nii denitrifikatsioon kui ka nitrifikatsioon.

N_2O ja N_2 voogudel oli statistiliselt usaldusväärne seos mullas lahustunud lämmastiku ja süsinikuga. Lahustunud lämmastik ja süsinik on toitaineks ning energiaallikaks mikroorganismidele. Kõigil mullakeemia väärtustel ei esinenud statistiliselt usaldusväärset seost gaasivoogudega, aga on näha trendi, kus kõrgemad väärtused esinesid 0-6 cm kihis. Ka see annab märku, et 0-6 cm kiht on aktiivsem.

5. Kokkuvõte

Järjest enam kasvava toiduvajaduse tõttu on hakatud kuivendama viljakaid madalsoid põllumajanduse eesmärgiks. Kuivendamine rikub soode looduslikku tasakaalu, muutes sood süsinikureservuaarist süsinikuemiteerijateks. Suurenevad CO₂ emissioonid ja vähenevad CH₄ emissioonid, aga vähenev CH₄ voog ei kompenseeri CO₂ eritumist. Lisaks põhjustab kuivendamine N₂O emissioonide suurenemise.

Antud töös uuriti kasvuhoonegaaside (CH₄, N₂O) ja õhulämmastiku (N₂) voorusid Aardlapalu poldrilt, mis oli enne poldri rajamist madal soo. Kasutati staatilise pimekambri meetodit ja HeO meetodit. Staatilise pimekambri meetodiga mõõdeti viiest kohast ~25 m² suuruselt ringikujuliselt alalt kolme päeva jooksul nii, et mõõdeti iga hommik ja õhtu. HeO meetodi jaoks võeti kambrimeetodi rõngaste lähedalt mullapuuriga viielt sügavuselt (0-6; 6-12; 12-18; 18-24; 24-30 cm) mullakehad. HeO meetodi peamiseks eeliseks on see, et saab mõõta ka N₂ emissioone, mida kambrimeetodiga teha ei saa, sest atmosfääris on peaaegu 80% N₂. Töö eesmärk oligi võrrelda pimekambri ja HeO meetodit.

Andmeanalüüs teostati Statistica 7 ja MS Excel-ga. Kasvuhoonegaaside emissioonide erinevuse hindamiseks kasutati Kruskal-Wallis ANOVA testi ning erinevate keskkonnaparameetrite seoste analüüsil rakendati Spearmani astakkorrelatsiooni. Tulemuste varieeruvuse hindamiseks arvutati variatsioonikordaja.

Leiti meetoditevahelised seosed nii N₂O kui CH₄ voogude vahel. Esinesid statistiliselt usaldusväärsed korrelatsioonid kambrimeetodil mõõdetud keskmiste voogude ja HeO meetodil 0-6 cm kihist mõõdetud voogude vahel. N₂O puhul kirjeldab HeO meetod pimekambri meetodit ~84% ulatuses, CH₄ puhul ~49% ulatuses. Nii N₂O kui ka CH₄ puhul oli hajusus kambrimeetodil väiksem. Seega tuleks võtta HeO meetodiga rohkem proove. Kuna HeO meetodil mõõdetud 0-6 cm kihi emissioonide variatsioonikordaja on väiksem kui HeO meetodil mõõdetud kõigi mõõtmiste variatsioonikordaja ning suuremad emissioonid tulid 0-6 cm kihist, siis tuleks võtta HeO meetodiga proove kõige ülemisest kihist. Enam veelgi, tuleks võtta ühest sügavusest rohkem kui 5 proovi, sest proovide hajusus on suur.

Töö esimene hüpotees ei kehti: HeO meetodiga mõõdetud N₂O emissioonid ei ole väiksemad pimekambri meetodil saadud väärtustest. Töö teine hüpotees kehtib: HeO meetodiga saadud N₂O emissioonid ja CH₄ sidumine on suuremad ülemisest mullakihist võetud proovides ning N₂ ja CH₄ emissioonid suuremad sügavamas kihist võetud proovides.

Kasutatud kirjandus

Amon, J., P.; Thompson, C., A.; Carpenter, Q., J.; Miner, J.; 2002; Temperate zone fens of the glaciated midwestern USA; WETLANDS vol. 22; p 301-317

Butterbach-Bahl, K.; Sander, B., O.; Pelster, D.; Diaz-Pines, E.; 2016; Quantifying Greenhouse Gas Emissions from Managed and Natural Soils

Butterbach-Bahl, K.; Willibald, G.; Papen, H.; 2002; Soil core method for direct simultaneous determination of N₂ and N₂O emissions from forest soils; Plant and Soil 240; p 105-116

Eickenscheidt, T.; Heinichen, J.; Augustin, J.; Freibauer, A.; Drösler, M.; 2014; Nitrogen mineralization and gaseous nitrogen losses from waterlogged and drained organic soils in a black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) forest; Biogeosciences 11; p 2961-2976

Huang, J.; Gao, J.; Yan, R.; 2016; A Phosphorus Dynamic model for lowland Polder systems (PDP); Ecological Engineering 88, p 242-255

Järvi Järveoja; 2011; Kasvuhoonegaaside emissioon päideroo abil rekultiveeritavalt turbatootmisalalt; magistritöö; 75p

Kaido Soosaar; 2010; Greenhouse gas fluxes in rural landscapes of Estonia; doctoral thesis; 55p.

Karki, S.; Elsgaard, L.; Kandel, T., P.; Laerke, P., E.; 2015; Full GHG balance of a drained fen peatland cropped to spring barley and reed canary grass using comparative assessment of CO₂ fluxes; Environ Monit Assess 187:62

Kobras AS; 2011; Aardla poldri veetaseme reguleerimise uuring lõpparuanne; Tartu

Liao, T.; Wang, R.; Zheng, X.; Sun, Y.; Butterbach-Bahl, K.; Chen, N.; 2013; Automated online measurement of N₂, N₂O, NO, CO₂, and CH₄ emissions based on a gas-flow-soil-core technique; Chemosphere 93; p 2848-2853

Loick, N.; Dixon, E., R.; Abalos, D.; Vallejo, A.; Matthews, G., P.; McGeugh, K., L.; Well, R.; Watson, C., J.; Laughlin, R., J.; Cardenas, L., M.; 2015; Denitrification as a source of nitric oxide emissions from incubated soil cores from a UK grassland soil; Soil Biology & Biochemistry 95; p 1-7

Mander, Ü.; Soosaar, K.; Maddison, M.; Lõhmus, K.; Kanal, A.; Teemusk, A.; Truu, J.; 2014; N₂O isotopomeeride uuringud ja N₂/N₂O vahekorra analüüs aitavad selgitada

denitrifikatsiooni efektiivsust ökosüsteemides; Uurimusi eestikeelse geograafia 95. aastapäeval; p 272-282

Münchmeyer, U.; Russow, R.; Augustin, J.; 2000; Net and Gross Nitrogen Mineralization in Drained and Reflooded Fen Soils; Isotopes in Environmental and Health Studies 36:1, p 79-98

Richards, B.; Craft, C., B.; 2015; Greenhouse Gas Fluxes from Restored Agricultural Wetlands and Natural Wetlands, Northwestern Indiana;

Wang, R; Willibald, G.; Feng, Q.; Zheng, X.; Liao, T.; Brüggemann, N.; Butterbach-Bahl, K.; 2011; Measurement of N₂, N₂O, NO, and CO₂ Emissions from Soil with the Gas-Flow-Soil-Core Technique

Lisa 1



Pilt 1. Pimekambrist õhuproovi kogumine.



Pilt 2. Mullaproovide kogumine HeO meetodiga N_2 , N_2O ja CH_4 määramiseks.

Lisa 2

Tabel 1. N₂O voogude variatsioonikordajad

Koht/Aeg/Sügavus		HeO meetod	Kambrimeetod
Koht	Rõngas 1	196%	79%
	Rõngas 2	161%	73%
	Rõngas 3	215%	53%
	Rõngas 4	98%	93%
	Rõngas 5	175%	136%
Sügavus	0-6 cm	96%	
	6-12 cm	202%	
	12-18 cm	105%	
	18-24 cm	180%	
	24-30 cm	190%	
Aeg	1. õhtu		65%
	1. hommik		28%
	2. õhtu		66%
	2. hommik		102%
	3. õhtu		49%
	3. hommik		174%

Tabel 2. CH₄ voogude variatsioonikordajad.

Koht/Aeg/Sügavus		HeO meetod	Kambrimeetod
Koht	Rõngas 1	232%	46%
	Rõngas 2	280%	44%
	Rõngas 3	238%	30%
	Rõngas 4	276%	53%
	Rõngas 5	67%	74%
Sügavus	0-6 cm	100%	
	6-12 cm	89%	
	12-18 cm	716%	
	18-24 cm	386%	
	24-30 cm	194%	
Aeg	1. õhtu		80%
	1. hommik		60%
	2. õhtu		84%
	2. hommik		60%
	3. õhtu		63%
	3. hommik		67%

Tabel 3. N₂ voogude variatsioonikordajad

Koht/Sügavus		HeO meetod
Koht	Rõngas 1	83%
	Rõngas 2	64%
	Rõngas 3	91%
	Rõngas 4	61%
	Rõngas 5	61%
Sügavus	0-6 cm	61%
	6-12 cm	79%
	12-18 cm	70%
	18-24 cm	79%
	24-30 cm	40%

Tänuavaldused

Suured tänud Martin Maddisonile, kes pakkus välja huvitava uurimisteema ja oli igati abivalmis antud bakalaureusetöö juhendamisel.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mihkel Kaljuvee

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„HeO meetodi ja kambrimeetodi võrdlus kasvuhoonegaaside N₂O ja CH₄ voogude mõõtmiseks Aardlapalu poldri näitel“

mille juhendaja on Martin Maddison

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus 22.05.2017